

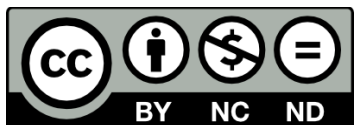


ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ II

Ενότητα 1: Σύνθετη Αντίσταση Εναέριων Γραμμών Μεταφοράς

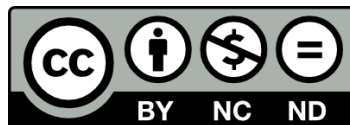
Λαμπρίδης Δημήτρης
Ανδρέου Γεώργιος

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Η/Υ



Άδειες Χρήσης

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons.
- Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.





Σύνθετη Αντίσταση Εναέριων Γραμμών Μεταφοράς



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΜΑΘΗΣΗ
επένδυση στην κοινωνία της γνώσης

ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΣΠΑ
2007-2013
πρόγραμμα για την ανάπτυξη
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

Περιεχόμενα ενότητας

Ηλεκτρικές παράμετροι γραμμών

- i. Ωμική Αντίσταση
- ii. Επαγωγική Αντίδραση
- iii. Χωρητική Αντίδραση



Αντικείμενα του μαθήματος

- Δίκτυα μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας στη μόνιμη κατάσταση
 - Εναέριες γραμμές
 - Υπόγεια καλώδια ισχύος
 - Λειτουργικά όρια
 - Ροή ενεργής/άεργης ισχύος



Ηλεκτρικές παράμετροι γραμμών

- Αναγκαίες για την κατάστροση ενός ισοδύναμου κυκλώματος.
- Αντιστοιχούν σε φυσικά φαινόμενα που εμφανίζονται κατά τη λειτουργία των γραμμών.
- Απαραίτητη η κατανόησή τους για την ουσιαστική ενασχόληση με τα ΣΗΕ.



Ωμική Αντίσταση

- Ως ιδιότητα της ύλης εξαρτάται από:
 - Υλικό (ειδική αντίσταση).
 - Διατομή.
 - Θερμοκρασία.
 - Συχνότητα ρεύματος (επιδερμικό φαινόμενο).
 - Γεωμετρία στην περίπτωση γειτονικών αγωγών (φαινόμενο γειτνίασης ή προσέγγισης).
- Η επίδραση κάθε παράγοντα μπορεί να υπολογιστεί με αναλυτικές σχέσεις.



DC ωμική αντίσταση στους 20° C

- Η απλούστερη περίπτωση (μεμονωμένος αγωγός που τροφοδοτείται με ρεύμα μηδενικής συχνότητας, σε θερμοκρασία 20° C):

$$R_{dc20} = \frac{\rho \cdot l}{A}$$

- ρ : Ειδική αντίσταση αγωγού ($\rho = 1,7241 \cdot 10^{-2} \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ για χαλκό και $\rho = 2,8264 \cdot 10^{-2} \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ για αλουμίνιο).
- l : Μήκος αγωγού (m).
- A : Διατομή αγωγού (mm^2).



DC ωμική αντίσταση σε οποιαδήποτε θερμοκρασία

- Αν είναι γνωστή η DC αντίσταση ενός αγωγού στους 20°C , τότε για οποιαδήποτε θερμοκρασία θα είναι:

$$R_{dc} = R_{dc20} \left[1 + \alpha_{20} (\theta_L - 20^{\circ}\text{C}) \right]$$

- α_{20} : Θερμοκρασιακός συντελεστής υλικού στους 20°C
($\alpha_{20} = 3,93 \cdot 10^{-3} [1/^{\circ}\text{C}]$ για το χαλκό και $\alpha_{20} = 4,03 \cdot 10^{-3} [1/^{\circ}\text{C}]$ για αλουμίνιο).
- θ_L : Η θερμοκρασία του αγωγού ($^{\circ}\text{C}$).



Κατασκευαστικοί Παράγοντες που επιδρούν στην τιμή της R_{DC}

- Κατεργασία του αγωγού.
- Συστροφή των συρματιδίων σε πολύκλωνους αγωγούς.
- Συστροφή των αγωγών φάσης (καλώδια).
- Συνολικά οι παραπάνω παράγοντες αυξάνουν την τιμή της R_{DC} κατά περίπου 3-4%.



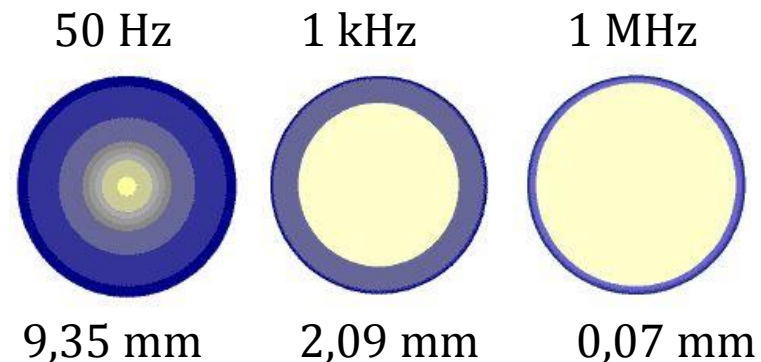
Επίδραση της συχνότητας στην ωμική αντίσταση (1/3)

- Επιδερμικό φαινόμενο: Όσο αυξάνεται η συχνότητα του ρεύματος, αυξάνεται επίσης και η πυκνότητά του κοντά στην επιφάνεια του αγωγού

- Επιδερμικό βάθος: $\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \sigma \mu}}$ [mm]

- f : Ηλεκτρική συχνότητα.
- σ : Ειδική αγωγιμότητα αγωγού.
- μ : Μαγνητική διαπερατότητα αγωγού.

- Παράδειγμα: Χαλκός



Επίδραση της συχνότητας στην ωμική αντίσταση (2/3)

- Το επιδερμικό φαινόμενο λαμβάνεται υπόψη κατά τον υπολογισμό της AC αντίστασης ενός αγωγού με τη βοήθεια ενός διορθωτικού συντελεστή F_S που πολλαπλασιάζεται με την R_{DC} :

$$R_{AC} = R_{DC} \cdot F_S$$

- Ο συντελεστής F_S προκύπτει από πεδιακούς υπολογισμούς.
- Μπορεί να υπολογιστεί με πολύ καλή ακρίβεια ακόμα και για συχνότητες της τάξης των εκατοντάδων MHz με τη βοήθεια των συναρτήσεων Bessel.
- Μέχρι συχνότητες της τάξης κάποιων kHz, ο F_S μπορεί να υπολογιστεί με προσεγγιστικούς τύπους.



Επίδραση της συχνότητας στην ωμική αντίσταση (3/3)

- **Προσεγγιστικοί τύποι του Goldenberg:** Για συχνότητες μέχρι της τάξης κάποιων kHz η απόκλιση από τις λύσεις που βασίζονται σε συναρτήσεις Bessel είναι της τάξης του 1%:

- Για:

$$x = 8,75 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{\frac{3,25 \cdot f}{R_{DC}}}$$

- είναι:

$$F_S = \begin{cases} \frac{192 + 1,8x^4}{192 + 0,8x^4}, & 0 < x \leq 2,8 \\ 0,864 - 0,0177x + 0,0563x^2, & 2,8 < x \leq 3,8 \\ 0,267 + 0,354x, & x > 3,8 \end{cases}$$



Επίδραση της γειτνίασης με άλλους αγωγούς στην ωμική αντίσταση (1/2)

- Φαινόμενο γειτνίασης:
 - Όταν βρίσκονται κοντά δύο αγωγοί που διαρρέονται από εναλλασσόμενα ρεύματα, τότε ο ένας επάγει δινορρεύματα στον άλλο.
 - Τα δινορρεύματα αυτά αλλάζουν την κατανομή των συνολικών ρευμάτων στους αγωγούς.
 - Αν τα συνολικά ρεύματα των αγωγών έχουν την ίδια φορά, τότε το αποτέλεσμα θα είναι αυξημένη πυκνότητα ρεύματος στις απομακρυσμένες πλευρές των αγωγών.
 - Αν τα συνολικά ρεύματα των αγωγών έχουν την αντίθετη φορά, τότε το αποτέλεσμα θα είναι αυξημένη πυκνότητα ρεύματος στις πλευρές των αγωγών που γειτνιάζουν.



Επίδραση της γειτνίασης με άλλους αγωγούς στην ωμική αντίσταση (2/2)

- Το φαινόμενο γειτνίασης λαμβάνεται υπόψη με τη βοήθεια ενός διορθωτικού συντελεστή F_p που πολλαπλασιάζεται με την R_{DC} :

$$R_{AC} = R_{DC} \cdot F_S \cdot F_P$$

- Ο συντελεστής F_p προκύπτει επίσης από πεδιακούς υπολογισμούς.
- Και σε αυτήν την περίπτωση όμως υπάρχουν προσεγγιστικοί τύποι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέχρι συχνότητες της τάξης κάποιων kHz.
- Ο υπολογισμός της επίδρασης του φαινομένου γειτνίασης όμως έχει νόημα μόνο στην περίπτωση που η απόσταση μεταξύ δύο ή περισσότερων αγωγών είναι συγκρίσιμη με τη διάμετρό τους.
- Για το λόγο αυτό λαμβάνεται υπόψη κυρίως στην περίπτωση των καλωδίων.



Επαγωγική Αντίδραση

- Οι αυτεπαγωγές και αλληλεπαγωγές χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό της επίδρασης των μαγνητικών πεδίων στις γραμμές.
- Σε έναν οποιονδήποτε αγωγό, η επίδραση του μαγνητικού πεδίου οφείλεται στην:
 - Αυτεπαγωγή.
 - Αμοιβαία επαγωγή μεταξύ του αγωγού και των υπόλοιπων αγωγών γύρω του.
- Σε ένα κύκλωμα n αγωγών υπολογίζουμε και χρησιμοποιούμε τη συνολική αυτεπαγωγή του.



Αυτεπαγωγή Αγωγού

- Εσωτερική: Οφείλεται στο μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό του αγωγού λόγω του ρεύματος που τον διαρρέει. Για έναν αγωγό με κυκλική διατομή είναι:

$$L'_i = \frac{\mu_0 \mu_r}{8\pi} \quad [\text{H/m}]$$

- Για μεγαλύτερες συχνότητες \rightarrow επιδερμικό φαινόμενο (συναρτήσεις Bessel).
- Υπάρχει και η έννοια της εξωτερικής αυτεπαγωγής, η οποία όμως πάντα υπολογίζεται σε σχέση με άλλους αγωγούς, οπότε τελικά για οποιοδήποτε κύκλωμα απλά υπολογίζουμε την αμοιβαία επαγωγή μεταξύ των εμπλεκόμενων αγωγών.



Αμοιβαίες επαγωγές μεταξύ αγωγών (1/2)

- Εξαρτώνται από τη συγκεκριμένη γεωμετρία κάθε προβλήματος.
- Για ένα κύκλωμα δύο αγωγών θα είναι (για κάθε αγωγό):

$$L'_o = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{d}{r} \quad [\text{H/m}]$$

- όπου:
 - d η απόσταση μεταξύ των κέντρων των αγωγών.
 - r η ακτίνα των αγωγών.
- Στη γενική περίπτωση αγωγών με διαφορετικές ακτίνες:

$$L'_o = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{d}{\sqrt{r_1 \cdot r_2}} \quad [\text{H/m}]$$



Αμοιβαίες επαγωγές μεταξύ αγωγών (2/2)

- Για κύκλωμα τριών αγωγών (τριφασικό σύστημα) θα είναι αντίστοιχα:

$$L'_o = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{d_m}{r} \quad [\text{H/m}]$$

- όπου d_m ο γεωμετρικός μέσος των αποστάσεων μεταξύ των κέντρων των αγωγών:

$$d_m = \sqrt[3]{d_{RS} \cdot d_{ST} \cdot d_{TR}} \quad [\text{m}]$$



Συνολική αυτεπαγωγή κυκλώματος (1/2)

- Προκύπτει για κάθε περίπτωση από το συνδυασμό των αντίστοιχων αυτεπαγωγών και αμοιβαίων επαγωγών των επιμέρους αγωγών.
- Για ένα κύκλωμα δύο αγωγών θα είναι (για κάθε αγωγό):

$$L' = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln \left(\frac{d}{r} \right) + \frac{\mu_r}{4} \right) \quad [\text{H/m}]$$

- Η αυτεπαγωγή του κυκλώματος προκύπτει από το γινόμενο της παραπάνω σχέσης με το συνολικό μήκος των δύο αγωγών που το απαρτίζουν ($2l$, όπου l το μήκος του κυκλώματος).



Συνολική αυτεπαγωγή κυκλώματος (2/2)

- Για κύκλωμα τριών αγωγών (τριφασικό σύστημα) θα είναι αντίστοιχα:

$$L' = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln \left(\frac{d_m}{r} \right) + \frac{\mu_r}{4} \right) \quad [\text{H/m}]$$

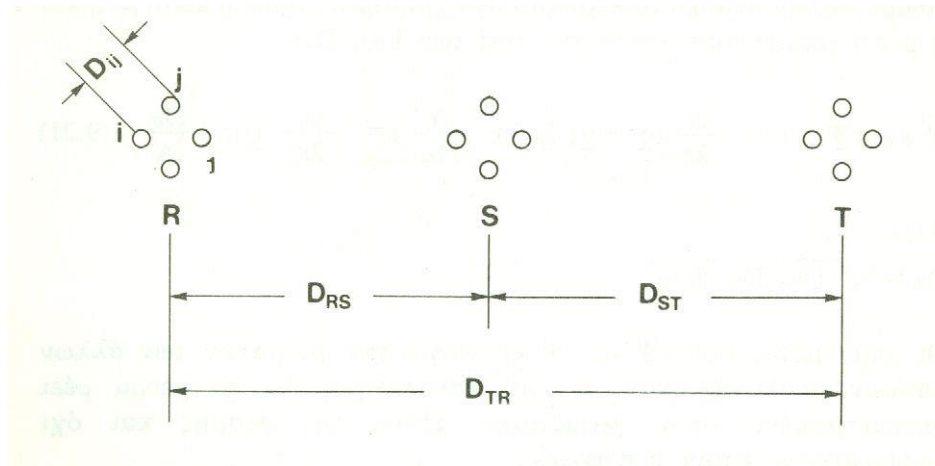
- Αυτή η σχέση μας δίνει τη συνολική ανά μονάδα μήκους αυτεπαγωγή λειτουργίας μιας τριφασικής γραμμής με έναν αγωγό ανά φάση, ανεξαρτήτως διάταξης των αγωγών
- Η αντίστοιχη ανά μονάδα μήκους επαγωγική αντίδραση θα είναι:

$$X' = \omega L' = 2\pi f \cdot L' \quad [\Omega/\text{m}]$$



Αυτεπαγωγές τριφασικών γραμμών με δέσμη αγωγών ανά φάση (1/2)

- Πολλαπλοί αγωγοί ανά φάση χρησιμοποιούνται για:
 - Μείωση των απωλειών Κορώνα.
 - Αύξηση της δυνατότητας φόρτισης μιας γραμμής.



- Αποδεικνύεται ότι ισχύουν οι προηγούμενοι τύποι, εφ' όσον για τις αποστάσεις και ακτίνες που υπεισέρχονται στους τύπους τεθούν ισοδύναμες ποσότητες.



Αυτεπαγωγές τριφασικών γραμμών με δέσμη αγωγών ανά φάση (2/2)

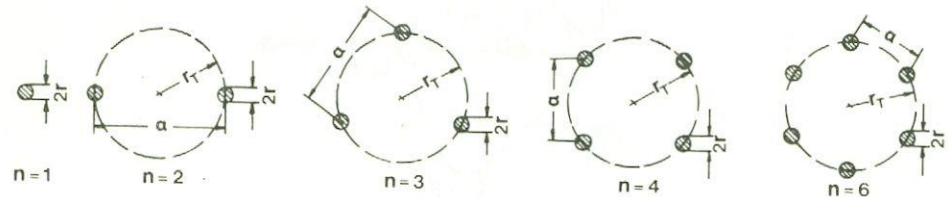
- Η αυτεπαγωγή λειτουργίας του τριφασικού κυκλώματος (ή εναλλακτικά μιας δέσμης ή μιας φάσης) θα είναι:

$$L' = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln \left(\frac{d_m}{r_b} \right) + \frac{\mu_r}{4n} \right) \quad [\text{H/m}]$$

- όπου:

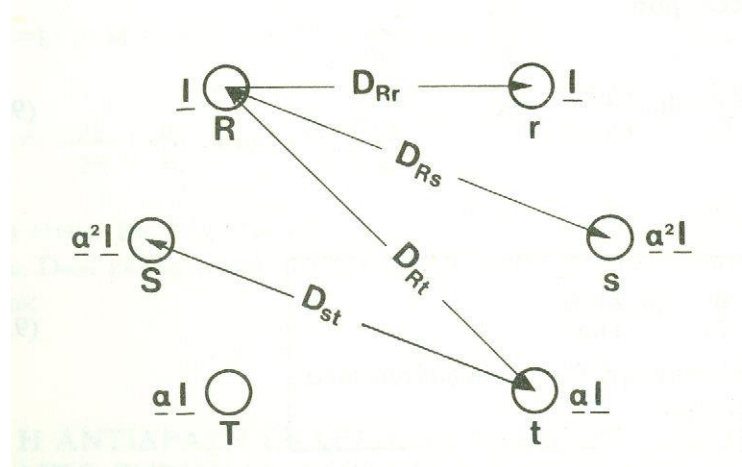
- r_b η ισοδύναμη ακτίνα αγωγών δέσμης:

$$r_b = r_T \cdot \sqrt[n]{n \frac{r}{r_T}}$$



Αυτεπαγωγή σε γραμμές με παράλληλα κυκλώματα (1/3)

- Σε ένα συμμετρικό σύστημα (ή στην ορθή συνιστώσα ενός ασύμμετρου συστήματος) το μαγνητικό πεδίο περιορίζεται στην περιοχή κοντά στους αγωγούς
- Η αλληλεπίδραση δύο γειτονικών τριφασικών κυκλωμάτων είναι λοιπόν ασθενής
- Το πεδίο σε αποστάσεις τριπλάσιες της γεωμετρικής απόστασης μεταξύ των αγωγών ενός κυκλώματος είναι αμελητέο



Αυτεπαγωγή σε γραμμές με παράλληλα κυκλώματα (2/3)

- Αμοιβαία επαγωγή μεταξύ δύο κυκλωμάτων στο ορθό σύστημα

$$M' = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{d_{mRs}}{d_{mRr}} \quad [\text{H/m}]$$

- όπου:

$$d_{mRs} = \sqrt[6]{D_{Rs} \cdot D_{Rt} \cdot D_{Sr} \cdot D_{St} \cdot D_{Tr} \cdot D_{Ts}}$$

$$d_{mRr} = \sqrt[3]{D_{Rr} \cdot D_{Ss} \cdot D_{Tt}}$$

- Από τους τύπους αυτούς φαίνεται ότι η αμοιβαία επαγωγή τείνει στο μηδέν όσο αυξάνονται οι αποστάσεις



Αυτεπαγωγή σε γραμμές με παράλληλα κυκλώματα (3/3)

- Η αυτεπαγωγή κάθε κυκλώματος, έστω L'_1 , θα είναι λοιπόν:

$$L'_1 = L' + M' = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln \left(\frac{d_m}{r} \right) + \frac{\mu_r}{4} + \ln \frac{d_{mRs}}{d_{mRr}} \right) \quad [\text{H/m}]$$

- ή:
$$L'_1 = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{\mu_r}{4} + \ln \left(\frac{d_m \cdot d_{mRs}}{r \cdot d_{mRr}} \right) \right) \quad [\text{H/m}]$$

- Στην περίπτωση πολλαπλών αγωγών ανά φάση, η παραπάνω αυτεπαγωγή θα γίνει:

$$L'_1 = L' + M' = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln \left(\frac{d_m}{r_b} \right) + \frac{\mu_r}{4n} + \ln \frac{d_{mRs}}{d_{mRr}} \right) \quad [\text{H/m}]$$

- ή:
$$L'_1 = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{\mu_r}{4n} + \ln \left(\frac{d_m \cdot d_{mRs}}{r_b \cdot d_{mRr}} \right) \right) \quad [\text{H/m}]$$



Αντίδραση εναέριων γραμμών στο ομοπολικό σύστημα (1/2)

- Όταν εμφανίζεται ασυμμετρία σε μια τριφασική γραμμή, τότε οι παραπάνω αναλύσεις αρκούν μόνο για τη θεώρηση της ορθής και αντίστροφης συνιστώσας.
- Στην ομοπολική συνιστώσα όμως τα πράγματα είναι διαφορετικά, κυρίως λόγω των ρευμάτων που επιστρέφουν από τη γη, και τα οποία επηρεάζουν τις αυτεπαγωγές των αγωγών.
- Η κατανομή της ρευματικής πυκνότητας στη γη εξαρτάται από το επιδερμικό φαινόμενο και το φαινόμενο γειτνίασης.
- Η πυκνότητα του ρεύματος είναι μεγαλύτερη στην επιφάνεια του εδάφους, στις περιοχές κοντά στους αγωγούς, και μειώνεται όσο απομακρυνόμαστε από αυτούς.



Αντίδραση εναέριων γραμμών στο ομοπολικό σύστημα (2/2)

- Στα 50 Hz η ρευματική πυκνότητα στο έδαφος κατανέμεται σε βάθος 900-5000 m, ανάλογα με την ειδική αντίσταση εδάφους.
- Αντίθετα, στη θάλασσα το βάθος διείσδυσης μπορεί να φτάσει στα 50-100 m.
- Σε μια πρώτη προσέγγιση μπορεί να θεωρηθεί ότι το ρεύμα είναι συγκεντρωμένο σε ένα βάθος (ρευματικό βάθος):

$$\delta = 93,2 \cdot \sqrt{\rho} \quad [\text{m}]$$

- όπου ρ η ειδική αντίσταση του εδάφους σε $\Omega \cdot \text{m}$.



Σύνθετη αντίσταση κυκλώματος που έχει ως επιστροφή τη γη

- Κύκλωμα ενός αγωγού με επιστροφή τη γη:
 - Για τις συνήθεις περιπτώσεις, όπου το μέσο ύψος ανάρτησης του αγωγού είναι πολύ μικρότερο του ρευματικού βάθους της γης, ισχύει (Carson, Pollaczek):

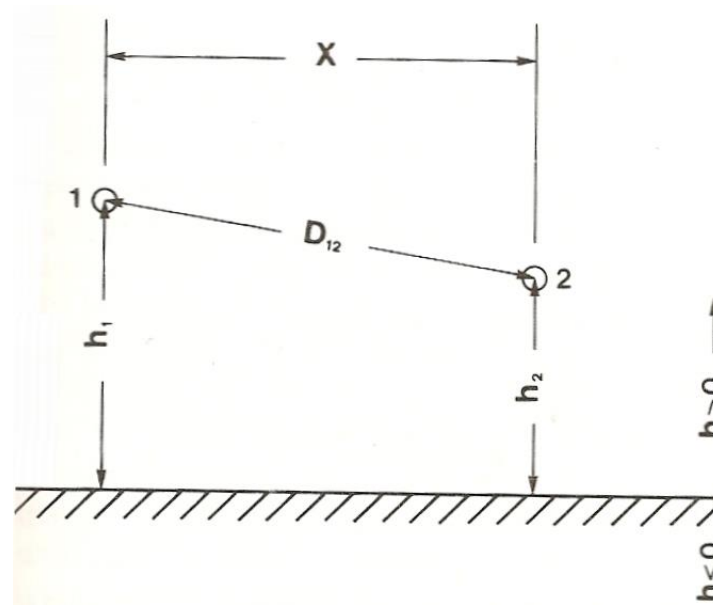
$$\bar{Z}'_{LE} = \left(R' + \frac{\omega \cdot \mu_0}{8} \right) + j \frac{\omega \cdot \mu_0}{2\pi} \cdot \left(\ln \left(\frac{\delta}{r} \right) + \frac{\mu_r}{4} \right) \quad [\Omega/\text{m}]$$

- Παρατηρούμε ότι η ωμική αντίσταση του κυκλώματος έχει δύο όρους:
 - Ωμική αντίσταση του ίδιου του αγωγού.
 - Ωμική αντίσταση που οφείλεται στην επιστροφή από το έδαφος: Ανεξάρτητη της ειδικής αντίστασης του εδάφους και περίπου ίση με 49 mΩ/km.



Σύστημα δύο παράλληλων αγωγών με επιστροφή τη γη (1/2)

- Στην περίπτωση αυτή δεν έχουμε απλές αμοιβαίες επαγωγές, αλλά αμοιβαίες σύνθετες αντιστάσεις, λόγω και της κοινής επιστροφής από τη γη.



- Πεδίο εφαρμογής: Δίκτυα τηλεφωνικών γραμμών, υπόγειες σωληνώσεις.



Σύστημα δύο παράλληλων αγωγών με επιστροφή τη γη (2/2)

- Για ύψη αρκετά μικρότερα του ρευματικού βάθους, η αμοιβαία σύνθετη αντίσταση θα είναι:

$$\bar{Z}'_{12} = \frac{\omega \cdot \mu_0}{2\pi} \left[\frac{\pi}{4} + j \cdot \ln \left(\frac{\delta}{D_{12}} \right) \right] \quad [\Omega/\text{m}]$$

- Για συνήθη εδάφη (με $\rho = 100 \Omega \cdot \text{m}$), και για τη βασική συχνότητα $f = 50 \text{ Hz}$, ο παραπάνω τύπος ισχύει με καλή ακρίβεια ($< 3\%$) για γραμμές που βρίσκονται σε απόσταση μεταξύ τους μέχρι 350 m.
- Οι γραμμές μπορεί να είναι εναέριες ή υπόγειες.



Σύνθετες αντιστάσεις τριφασικών γραμμών στο ομοπολικό σύστημα

- Στη γενική περίπτωση γραμμής με δέσμες n αγωγών ανά φάση, θα είναι:

$$\bar{Z}'_0 = R'_0 + jX'_0 \quad [\Omega/\text{m}]$$

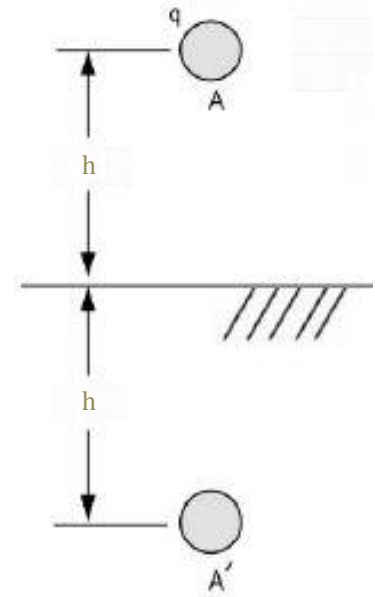
$$R'_0 = \frac{R'_1}{n} + \frac{3\mu_0\omega}{8} \quad [\Omega/\text{m}]$$

$$X'_0 = \frac{\mu_0\omega}{2\pi} \cdot \left[3\ln\left(\frac{\delta}{\sqrt[3]{r_b D_m^2}}\right) + \frac{\mu_r}{4n} \right] \quad [\Omega/\text{m}]$$



Χωρητικότητα γραμμών (1/10)

- Τη χρησιμοποιούμε για να καθορίσουμε τα εγκάρσια ρεύματα διαρροής μεταξύ των αγωγών, καθώς και μεταξύ των αγωγών και της γης.
- Εκφράζεται μεταξύ δύο σημείων ως το ηλεκτρικό τους φορτίο ανά μονάδα διαφοράς δυναμικού μεταξύ τους.
- Για την απλή περίπτωση ενός αγωγού (ακτίνας r) και γης (σε απόσταση h):
 - Μέθοδος κατοπτρισμού.
 - Ισοδύναμη με την περίπτωση δύο αγωγών με διπλάσια απόσταση και τάση.



Χωρητικότητα γραμμών (2/10)

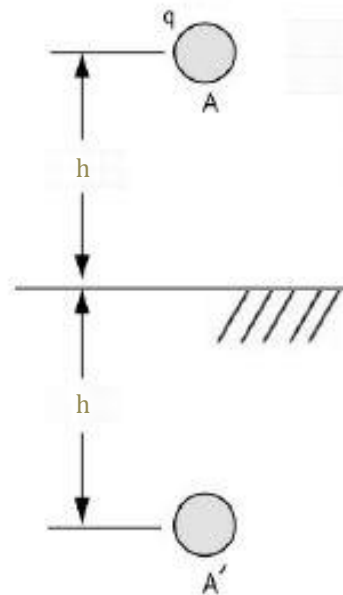
- Στην περίπτωση αυτή ισχύει:

$$u_{Li} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{2h}{r}\right) \cdot q'_i$$



Ίδιος συντελεστής δυναμικού P'_{ii} : Εκφράζει την τάση του αγωγού i ως προς γη, σε σχέση με το ηλεκτρικό φορτίο του.

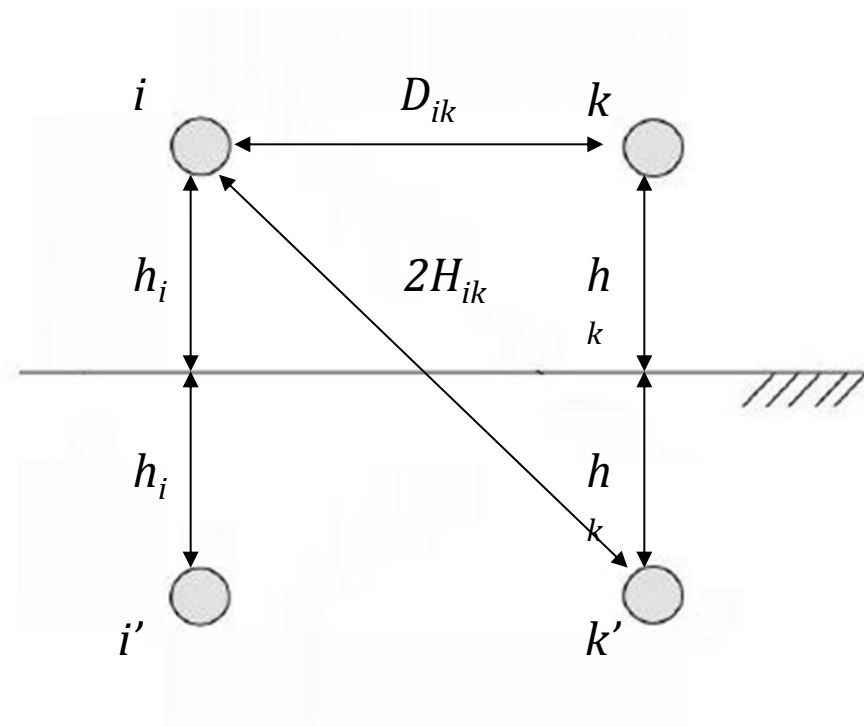
$$C'_{LiE} = \frac{1}{P'_{ii}} = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln\left(\frac{2h}{r}\right)} \quad [\text{F/m}]$$



Χωρητικότητα γραμμών (3/10)

Αμοιβαίος συντελεστής δυναμικού P'_{ik} : Εκφράζει την τάση του αγωγού i ως προς γη, σε σχέση με το φορτίο του αγωγού k .

$$P'_{ik} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{2H_{ik}}{D_{ik}}\right) = P'_{ki}$$



Χωρητικότητα γραμμών (4/10)

- Κύκλωμα πολλών αγωγών (έστω τριών).
- Θα ξεκινήσουμε θεωρώντας συμμετρικό τριφασικό σύστημα.
- Θεωρώντας μονοφασικό ισοδύναμο, αρκεί να υπολογίσουμε το λόγο του ηλεκτρικού φορτίου μιας φάσης (έστω της a) προς την αντίστοιχη φασική τάση.
- Σύμφωνα με τα παραπάνω ισχύει:

$$U_a = P'_{aa} q'_a + P'_{ab} q'_b + P'_{ac} q'_c$$

- Για συμμετρικό σύστημα θα είναι όμως:

$$P'_{ab} = P'_{ac}$$

- Επίσης, στο ορθό και αντίστροφο σύστημα ισχύει:

$$q'_a + q'_b + q'_c = 0$$



Χωρητικότητα γραμμών (5/10)

- Θα είναι λοιπόν:

$$U_a = (P'_{aa} - P'_{ab})q'_a$$

- Στο ορθό και αντίστροφο σύστημα, η χωρητικότητα (χωρητικότητα λειτουργίας) ορίζεται ως εξής:

$$C'_1 = C'_2 = \frac{|q'_a|}{|U_a|} = \frac{1}{P'_{aa} - P'_{ab}}$$

- Σύμφωνα με τα προηγούμενα θα είναι τελικά:

$$C'_1 = C'_2 = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{2h_a}{r_a} - \ln \frac{2H_{ab}}{D_{ab}}} = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{h_a D_{ab}}{r_a H_{ab}}}$$



Χωρητικότητα γραμμών (6/10)

- Στη γενική περίπτωση:
 - Στο ορθό και αντίστροφο σύστημα θα είναι:

$$C' = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln\left(\frac{D_m h_m}{rH_m}\right)} \quad [\text{F/m}]$$

όπου:

- h_m ο γεωμετρικός μέσος του ύψους των αγωγών: $h_m = \sqrt[3]{h_R \cdot h_S \cdot h_T} \quad [\text{m}]$

- $2H_m$ ο γεωμετρικός μέσος των αποστάσεων μεταξύ κάθε φάσης και των ειδώλων των άλλων φάσεων:

$$2H_m = \sqrt[3]{H_{RS'} \cdot H_{RT'} \cdot H_{ST'}} \quad [\text{m}]$$

- D_m ο γεωμετρικός μέσος των αποστάσεων μεταξύ των φάσεων:

$$D_m = \sqrt[3]{D_{RS} \cdot D_{ST} \cdot D_{TR}} \quad [\text{m}]$$



Χωρητικότητα γραμμών (7/10)

- Σε συνηθισμένες περιπτώσεις ισχύουν:

$$D_m \ll h_m$$

- και:

$$h_m \approx H_m$$

- οπότε τελικά η χωρητικότητα λειτουργίας μιας τριφασικής γραμμής γίνεται:

$$C' = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln\left(\frac{D_m}{r}\right)} \quad [\text{F/m}]$$



Χωρητικότητα γραμμών (8/10)

- Χωρητικότητα τριφασικής γραμμής στο ομοπολικό σύστημα
 - Η διαφορά στην περίπτωση αυτή είναι ότι τα φορτία είναι ίσα σε κάθε φάση, οπότε ακολουθώντας την παραπάνω ανάλυση:

$$C'_0 = \frac{2\pi\epsilon_0}{3\ln\left(\frac{2h_m(2H_m)^2}{rD_m^2}\right)} \quad [\text{F/m}]$$

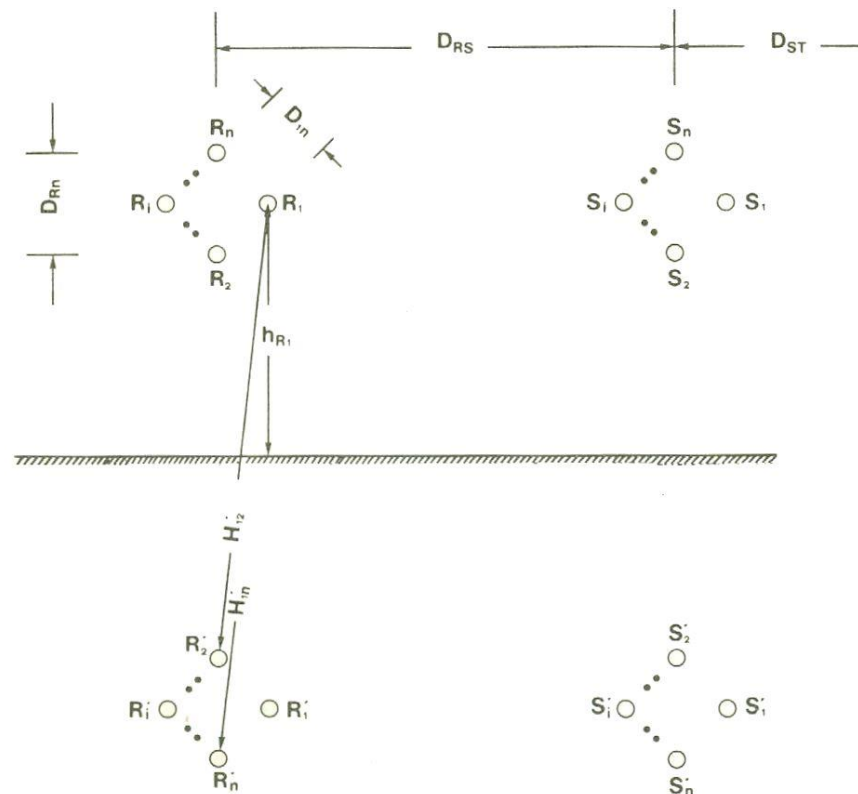
- Για τις συνηθισμένες γραμμές ($h_m \approx H_m$) θα είναι:

$$C'_0 = \frac{2\pi\epsilon_0}{3\ln\left(\frac{2h_m}{\sqrt[3]{rD_m^2}}\right)} \quad [\text{F/m}]$$



Χωρητικότητα γραμμών (9/10)

- Χωρητικότητα τριφασικής γραμμής με δέσμες αγωγών ανά φάση:



Χωρητικότητα γραμμών (10/10)

- Χωρητικότητα τριφασικής γραμμής με δέσμες αγωγών ανά φάση
 - Ισχύει ο τύπος που αντιστοιχεί στην απλή τριφασική γραμμή, όπου οι δέσμες αντικαθίστανται με ιδεατούς αγωγούς με άξονα τον άξονα της δέσμης και ακτίνα μια ισοδύναμη ακτίνα r_b

$$C' = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln\left(\frac{D_m h_m}{r_b H_m}\right)} \quad [\text{F/m}]$$

$$r_b = r_T \cdot \sqrt[n]{n \frac{r}{r_T}}$$



Παράγοντες που επηρεάζουν τις αυτεπαγωγές και χωρητικότητες

- Οι αυτεπαγωγές και οι χωρητικότητες είναι μεγέθη που εξαρτώνται μόνο από τη γεωμετρία ενός κυκλώματος.
- Έτσι, δύο κυκλώματα διαφορετικής τάσης και φόρτισης, θα έχουν τις ίδιες λειτουργικές αυτεπαγωγές και χωρητικότητες, αρκεί να έχουν την ίδια γεωμετρία.
- Αυτό που αλλάζει είναι η τελική επίδραση των στοιχείων αυτών σε ένα κύκλωμα, δηλαδή:
 - Οι τάσεις που θα επαχθούν από φάση σε φάση λόγω των αυτεπαγωγών θα διαφέρουν ανάλογα με το ρεύμα του κυκλώματος, και,
 - Τα εγκάρσια ρεύματα διαρροής σε ένα κύκλωμα λόγω των χωρητικοτήτων θα διαφέρουν ανάλογα με το επίπεδο τάσης του.



Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Λαμπρίδης Δημήτρης
Ανδρέου Γεώργιος. «ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ II, Σύνθετη
Αντίσταση Εναέριων Γραμμών Μεταφοράς». Έκδοση: 1.0. Θεσσαλονίκη 2015
Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση:
http://opencourses.auth.gr/eclass_courses.



Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά - Μη Εμπορική Χρήση - Όχι Παράγωγα Έργα 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.

Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:

- που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
- που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
- που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και αδειοδόχο έμμεσο οικονομικό όφελος (π.χ. διαφημίσεις) από την προβολή του έργου σε διαδικτυακό τόπο

[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>





Τέλος ενότητας

Επεξεργασία: Σβάρνα Κωνσταντίνα
Θεσσαλονίκη, Χειμερινό εξάμηνο 2014-2015



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΣΠΑ
2007-2013
πρόγραμμα για την ανάπτυξη
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ